

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-93-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-93-109)
УДК 624.138.232.1

EDN: РТЕСКЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ГРУНТОЦЕМЕНТНОЙ ПУЛЬПЫ

Д.В. АНТОНЕНКО^{1,2,✉}А.В. ШАПОШНИКОВ², канд. техн. наукА.И. МИСЮК²О.А. ШУЛЯТЬЕВ², д-р техн. наукИ.Н. ТИХОНОВ^{1,3}, д-р техн. наукК.П. ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ¹, д-р техн. наук¹ АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсегова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация³ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Технология струйной цементации является одной из самых востребованных в геотехнике. Геотехнические конструкции, выполненные по данной технологии, являются скрытыми и требуют особого контроля заданных параметров. В настоящее время в нормативной документации установлены положения контроля в основном только после выполнения работ для набравшего прочность закрепленного грунта. Такие методы контроля не могут оказать влияние на результат работ, а только констатируют его. Для возможности контролируемого влияния на результат необходимо разработать метод оперативного контроля производства работ, на основании которого будет возможно регулировать процесс во время работ так, чтобы достигался необходимый результат. Одним из решений данного вопроса может стать оперативный контроль качества закрепления по параметрам изливаемой при струйной цементации грунтоцементной пульпы.

Цель. Исследование вопросов контроля при закреплении грунта методом струйной цементации на основании физико-механических характеристик изливаемой в процессе закрепления грунтоцементной пульпы.

Материалы и методы. Исследование было проведено на образцах, полученных в лабораторных условиях. Материалы для лабораторных образцов: песок мелкий, средней крупности, крупный, суглинок, глина, цемент ЦЕМ 042,5Н, вода. Лабораторные образцы изготавливались путем смешивания различных составов грунтоцементной смеси, моделирующих грунтоцементную пульпу, преобразующуюся в процессе отверждения в грунтоцемент. Исследования лабораторных образцов заключались в определении плотности в жидком состоянии и плотности, прочности после твердения.

Результаты. Получена зависимость увеличения прочности грунтоцемента при увеличении плотности грунтоцементной пульпы в рамках изменения соотношения компонентов состава пульпы.

Выводы. Проведенные исследования позволили оценить влияние количественного соотношения составных частей в моделях грунтоцементной смеси (пульпы) на ее плотность и, как следствие, на прочность и плотность образцов грунтоцемента.

Ключевые слова: струйная цементация, jet grouting, грунтоцемент, пульпа, прочность ГЦЭ, оперативный контроль, грунтоцементная смесь, грунтоцементный элемент, закрепление грунта

Для цитирования: Антоненко Д.В., Шапошников А.В., Мисюк А.И., Шулятьев О.А., Тихонов И.Н., Пятикрестовский К.П. Исследование вопросов оперативного контроля струйной цементации грунтов по параметрам грунтоцементной пульпы. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;43(4):93–109. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-93-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-93-109)

Вклад авторов

Антоненко Д.В. – разработка методики исследований, проведение исследований, анализ результатов, определение зависимостей, написание статьи.

Шапошников А.В. – общее руководство работами, разработка методики исследований, анализ полученных зависимостей.

Мисюк А.И. – проведение исследований, оформление статьи.

Шулятьев О.А., Тихонов И.Н., Пятикрестовский К.П. – общее руководство работами.

Финансирование

Финансирование НИОКР по внутреннему соглашению № 16 от АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.11.2024

Поступила после рецензирования 29.11.2024

Принята к публикации 05.12.2024

STUDY OF OPERATIONAL CONTROL ISSUES IN JET GROUTING BASED ON THE PARAMETERS OF THE SPOIL RETURN JET GROUTED MATERIAL

D.V. ANTONENKO^{1,2,✉}

A.V. SHAPOSHNIKOV², Cand. Sci. (Engineering)

A.I. MISYUK²

O.A. SHULYATYEV², Dr. Sci. (Engineering)

I.N. TIKHONOV^{1,3}, Dr. Sci. (Engineering)

K.P. PYATIKRESTOVSKY¹, Dr. Sci. (Engineering)

¹JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

²Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

³Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Jet grouting technology is one of the most popular in geotechnics. Geotechnical structures made using this technology are hidden and require special control of the specified parameters. Currently, regulatory documentation establishes control provisions mainly only after the completion of work for the stabilization soil that has gained strength. Such control methods cannot influence the result of the work, but only state the result. In order to have a controlled effect on the result, it is necessary to develop a method of operational control of the work, on the basis of which it will be possible to regulate the process during the work so as to achieve the desired result. One of the solutions to this issue may be operational control of the quality of stabilization based on the parameters of the spoil return jet grouted material poured out during jet grouting.

Aim. Study of control issues during soil stabilization by the method of jet grouting based on the physical and mechanical characteristics of the spoil return jet grouted material poured out during stabilization.

Materials and methods. The study was conducted on samples obtained in laboratory conditions. Materials for laboratory samples: fine, medium and coarse sand, loam, clay, CEM 0 42.5N cement, water. Laboratory samples were made by mixing different compositions of mixture jet grouted material, simulating spoil return jet grouted material, which is transformed into jet grouted material during hardening. The studies of laboratory samples consisted in determining the density in the liquid state and the density, strength after hardening.

Conclusions. The conducted studies allowed us to evaluate the effect of the quantitative ratio of the components in the models mixture of jet grouted material (spoil return) on its density and, as a result, on the strength and density of soil cement samples.

Results. The dependence of the increase in the strength of the jet grouted material with an increase in the density of the spoil return jet grouted material was obtained, within the framework of the change in the ratio of the components of the spoil return content.

Keywords: jet grouting, jet grouted material, spoil return, strength of jet grouted material, operational control, a mixture jet grouted material, jet grouted element, soil stabilization

For citation: Antonenko D.V., Shaposhnikov A.V., Misyuk A.I., Shulyatyev O.A., Tikhonov I.N., Pyatikrestovsky K.P. Study of operational control issues in jet grouting based on the parameters of the spoil return jet grouted material. *Vestnik NIC Stroitel' stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;43(4):93–109. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-93-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-93-109)

Authors contribution statement

Antonenko D.V. – development of research methodology, conducting research, analysis of the results, determination of dependencies, writing the article.

Shaposhnikov A.V. – general guidance, development of research methodology, analysis of the obtained dependencies.

Misyuk A.I. – conducting research, writing the article.

Shulyatyev O.A., Tikhonov I.N., Pyatikrestovsky K.P. – general guidance.

Funding

Funding for Research and Development was provided under internal agreement No. 16 by JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.11.2024

Revised 29.11.2024

Accepted 05.12.2024

Введение

Геотехнические конструкции, выполненные по технологии струйной цементации, могут быть использованы в качестве искусственных оснований и различных защитных ограждающих конструкций. В современной практике все чаще обращаются к данной технологии для решения широкого спектра имеющихся проблем на объектах строительства.

В связи с высокой востребованностью технологии сформирован запрос на усовершенствование ее параметров, увеличение надежности выполняемых с помощью нее геотехнических конструкций и снижение их стоимости. Одним из возможных путей удовлетворения данного

запроса может являться усовершенствование методов и принципов контроля качества конструкций, сформированных по технологии струйной цементации.

В настоящее время нормативная документация основным способом контроля предписывает отбор кернов непосредственно из элемента закрепленного грунта, но такие операции являются дорогостоящими и длительными. Кроме этого, отбор керна является средством контроля, выполняемым после производства работ и твердения грунтоцемента (ГЦ), что означает отсутствие возможности влияния на результат по итогам проводимого контроля. Следует отметить, что кроме контроля с помощью отбора кернов нормативная документация позволяет применять в качестве дополнительных к отбору керна методов контроль по прочности образцов из грунтоцементной пульпы (ГП) и контроль с помощью штамповых испытаний и геофизических методов [1]. Данные методы в основном применяются на этапе приемки, достаточно локальны по объемам, а значит, являются ограниченными в своем применении и также не имеют возможности оказывать влияние на результат проводимых работ.

В соответствии с этим в настоящее время вопросы оперативного контроля являются крайне актуальными, их решение в части разработки нового улучшенного метода контроля позволит оказывать воздействие на результат в процессе производства работ. При этом разрабатываемый метод должен характеризоваться высокой надежностью, оперативностью, а также должен снижать стоимость применения технологии и производства сопутствующих работ. Перспективным решением данной задачи может стать оперативный метод прогнозирования характеристик грунтоцементного элемента (ГЦЭ) по показателю плотности изливаемой в процессе производства работ пульпы, учитывающий тип технологии струйной цементации jet-1 и jet-2. Уникальность данного метода заключается в возможности определять отклонения от заданных контролируемых параметров (прочность ГЦЭ) в процессе производства работ по показателю плотности грунтоцементной пульпы, что позволит в случае необходимости корректировать технологические параметры определенным образом для обеспечения требуемых характеристик.

Большой вклад в развитие струйной цементации внесли И.И. Бройд [2], А.Г. Малинин [3, 4], М.Н. Ибрагимов [5, 6], Л.И. Малышев и М.Ф. Хасин [7], В.Н. Корольков и М.И. Смородинов [8], А.В. Черняков [9] и др. Эти авторы написали множество статей, научных работ и книг. Помимо исследований представленных ранее авторов, в Российской Федерации специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсегова были разработаны нормативные документы СП 22.13330.2016 [10], СП 45.13330.2017 [1], СП 291.1325800.2017 [11], ГОСТ Р 70696-2023 [12], ГОСТ Р 70695-2023 [13], ГОСТ Р 59706-2022 [14], ГОСТ Р 59538-2021 [15]. Кроме этого, проводилось множество научных исследований, в результате которых были составлены рекомендации, методики и инструкции на основании проделанных работ [16–20].

Кроме российских норм существует множество зарубежных документов: Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1: General Rules [21]; Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 2: Ground investigation and testing [22]; BSI BS EN 12716-2018. Execution of Special Geotechnical Work – Jet Grouting [23]. За рубежом, как и в Российской Федерации, исследователи постоянно решают вопросы технологии струйной цементации и выпускают научные труды и статьи с результатами работ [24, 25].

Исследования, представленные в данной статье, проводились в рамках выполнения НИОКР внутреннего финансирования АО «НИЦ «Строительство» по теме: «Исследование вопросов контроля цементации грунтов гидроструйным методом по параметрам грунтоцементной пульпы» в 2023–2024 гг.

Исследования проводились:

- на образцах и пробах исходных цементных растворов, изготовленных в лаборатории (плотность, водоотделение, сроки схватывания, подвижность);
- на образцах и пробах грунтоцементной пульпы и грунтоцемента, изготовленных на основе моделей пульпы в лабораторных условиях. Пульпу испытывали на плотность. Грунтоцемент испытывали на плотность и прочность.

Для лабораторных исследований использовался цемент ЦЕМ 042,5Н, грунт и вода водопроводная.

Грунт, используемый для изготовления образцов и проб в лабораторных условиях, в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [26]:

- глина с числом пластичности 24 % легкая твердая (высушенная);
- суглинок с числом пластичности 8 % легкий твердый (высушенный);
- песок мелкий сухой с влажностью не более 3 %;
- песок средней крупности сухой с влажностью не более 3 %;
- песок крупный сухой с влажностью не более 3 %.

Исследования образцов и проб исходных цементных растворов, изготовленных в лаборатории

Для проведения исследований исходных цементных растворов были приняты цементные растворы с водоцементным отношением (В/Ц), соответствующим В/Ц исходных цементных растворов, принятых в данной работе для моделей грунтоцементной пульпы (В/Ц 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0).

Пробы и образцы цементного раствора изготавливались путем перемешивания в лабораторном смесителе компонентов (цемент и вода) в необходимой пропорции для каждого В/Ц. Плотность растворов определялась в соответствии с ГОСТ Р 70696-2023 [12] и ГОСТ 5802-86 [27], водоотделение – в соответствии с ГОСТ Р 70696-2023 [12] и ГОСТ 34532-2019 [28]. Подвижность для раствора с В/Ц 0,8 определялась по ГОСТ Р 70696-2023 [12] и ГОСТ 34532-2019 [28]. Вязкость для растворов с В/Ц 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 определялась по ГОСТ Р 70696-2023 [12], ГОСТ 33213-2014 [29] (ISO 10414-1:2008) и ГОСТ Р 70308-2022 [30]. Для определения сроков схватывания исходных цементных растворов использовался метод, соответствующий методике ГОСТ Р 70696-2023 [12] и ГОСТ 310.3-76 [31].

В табл. 1 представлены результаты исследований исходных цементных растворов с В/Ц 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 на подвижность/вязкость, водоотделение, сроки схватывания и плотность.

Исследования образцов и проб грунтоцементной пульпы и грунтоцемента, изготовленных в лаборатории

Образцы и пробы грунтоцементной пульпы и грунтоцемента, изготовленные в лабораторных условиях, исследовались по следующим показателям:

- плотность грунтоцементной пульпы;
- плотность грунтоцемента до водонасыщения и после водонасыщения;
- прочность грунтоцемента в водонасыщенном состоянии на 21-е сутки.

Грунтоцементная пульпа изготавливалась путем перемешивания исходных компонентов в определенных пропорциях по составам, представленным в табл. 2, с помощью строительного миксера. Температурно-влажностные условия при смешивании компонентов:

Таблица 1

Результаты исследований исходных цементных растворов

Table 1

Results of initial cement mortar tests

В/Ц	Подвиж- ность, см	Вязкость, сек	Водоотделе- ние, %	Начало схва- тывания, мин	Конец схва- тывания, мин	Плотность, г/см ³
0,8	32 (П4)	–	4,8 % – стабильный	720	1110	1,63
1,0	–	16,91	11,2 % – условно стабильный	840	1560	1,55
1,5	–	15,39	32,9 % – нестабильный	1290	3000	1,39
2,0	–	15,35	40,4 % – нестабильный	1470	4920	1,3
3,0	–	14,9	56,7 % – нестабильный	2340	8340	1,22

Начало и конец схватывания отсчитываются от времени начала затворения

влажность – 40–60 %, температура – 22–23 °С. Цементный раствор замешивался отдельно в лабораторном смесителе и в дальнейшем вливался в грунт, перемешиваемый на высоких оборотах с помощью миксера. Полученная смесь в жидком состоянии принимается как грунтоцементная пульпа. После заполнения стандартных форм грунтоцементной пульпой и ее отвердевания полученный материал принимается как грунтоцемент. В данной работе для лабораторных исследований составы грунтоцементной пульпы и грунтоцемента идентичны по соотношению составляющих (грунт – цемент – вода). Газовая компонента ввиду механического перемешивания и полного водосодержания (водонасыщения) грунтоцементной пульпы (после смешивания компонентов) в формировании образцов и влиянии на их характеристики не учитывалась. Присутствие незначительного объема вовлеченного воздуха за счет усадки при формировании кристаллической решетки при таком уровне содержания жидкости в пульпе и способе приготовления смеси (механическое перемешивание) не оказывает практического влияния на итоговые свойства закрепленного грунта.

Содержание компонентов, в том числе цемента, для составов по табл. 2 указано на 1 м³ и не может соотноситься напрямую с расходами цемента на 1 м. п. в процессе струйной цементации в натуре.

Составы, принятые в табл. 2, подобраны на основании обеспечения адекватной прочности образцов для проведения испытаний и анализа результатов исследований, в том числе в соответствии с прочностью образцов реального грунтоцемента.

Для грунтоцементной пульпы плотность отобранной пробы измерялась весовым способом в соответствии с ГОСТ Р 70696-2023 [12], ГОСТ 5802-86 [27]. Кроме этого, по аналогичной методике с отступлением по виду и объему тары, используемой для взвешивания (использовалось ведро объемом 10–20 литров), измерялась плотность всего состава («в замесе»). Результаты измерения плотности для всего состава «в замесе» характеризуются большой

Таблица 2

Составы грунтоцементной пульпы, изготовленной в лаборатории

Table 2

Compositions of the spoil return jet grouted material prepared in the laboratory

№	Марка	Тип грунта	В/Ц	Грунт, кг	Цемент, кг	Вода, кг	Расчетная плотность смеси, кг/м³
				на 1 м³			
1	А	глина	0,8	280	796,68	637,35	1714
2	Б	глина	1,0	280	676,21	676,21	1632
3	В	глина	1,5	280	490,70	736,05	1507
4	Г	глина	2,0	280	385,06	770,13	1435
5	Д	глина	3,0	280	269,17	807,51	1357
6	Е	суглинок	0,8	650	672,31	537,84	1860
7	И	суглинок	1,0	650	570,64	570,64	1791
8	К	суглинок	1,5	650	414,09	621,14	1685
9	Л	суглинок	2,0	650	324,95	649,90	1625
10	М	суглинок	3,0	650	227,15	681,44	1559
11	У	песок мелкий	0,8	1000	554,65	443,72	1998
12	Ф	песок мелкий	1,0	1000	470,78	470,78	1942
13	Х	песок мелкий	1,5	1000	341,63	512,44	1854
14	Э	песок мелкий	2,0	1000	268,08	536,16	1804
15	УУ	песок мелкий	3,0	1000	187,40	562,19	1750
16	АА	песок средней крупности	0,8	1000	554,65	443,72	1998
17	ГГ	песок средней крупности	1,0	1000	470,78	470,78	1942
18	ПП	песок средней крупности	1,5	1000	341,63	512,44	1854
19	ТТ	песок средней крупности	2,0	1000	268,08	536,16	1804
20	ХХ	песок средней крупности	3,0	1000	187,40	562,19	1750
21	СС	песок крупный	0,8	1000	554,65	443,72	1998
22	НН	песок крупный	1,0	1000	470,78	470,78	1942
23	АУ	песок крупный	1,5	1000	341,63	512,44	1854
24	ХУ	песок крупный	2,0	1000	268,08	536,16	1804
25	ХТ	песок крупный	3,0	1000	187,40	562,19	1750
Расчет сформирован на основании условно принятого содержания грунта в 1 м³ грунтоцементной смеси: 1000 кг – для песков; 280 кг – для глины с числом пластичности 24%; 650 кг – для суглинка с числом пластичности 8%. Плотность частиц грунта для расчета принята равной 2650 кг/м³. Плотность частиц цемента для расчета принята равной 3100 кг/м³							

погрешностью измерения и необходимы для сравнения относительного отличия между расчетной плотностью, плотностью отобранной пробы и плотностью всей массы смеси.

Твердение грунтоцементной пульпы для формирования грунтоцемента в лабораторных условиях происходило в кубических формах размером $70 \times 70 \times 70$ мм. Формы с образцами хранились в герметично упакованных емкостях при температуре $22\text{--}23^\circ\text{C}$ и влажности 98–99%. После чего не ранее 7-го дня проводилась распалубка образцов и перемещение в нормально-влажные условия (НВУ). В возрасте 9 суток проводилось измерение плотности образцов с последующим водонасыщением в соответствии с ГОСТ Р 70695-2023 [13].

Испытание на прочность и измерение плотности в водонасыщенном состоянии образцов грунтоцемента проводились на 21-е сутки. Полученная прочность в дальнейшем была приведена к нормируемой прочности на 28-е сутки по коэффициентам ГОСТ Р 70695-2023 [13].

Плотность грунтоцемента измерялась по методике ГОСТ Р 70695-2023 [13] и ГОСТ 5802-86 [27] весовым методом. Исследование прочности на одноосное сжатие проводилось в электронной машине для испытаний в соответствии с методикой по ГОСТ Р 70695-2023 [13] и ГОСТ 5802-86 [27]. Скорость нагружения образцов – 1,47 кН/с.

На рис. 1 представлен процесс изготовления, твердения и испытания образцов грунтоцемента.

Результаты измерения плотности грунтоцементной пульпы и плотности, прочности на одноосное сжатие образцов грунтоцемента представлены в табл. 3.



Рис. 1. Процесс изготовления, твердения и испытания образцов грунтоцемента
Fig. 1. Process of manufacturing, hardening and testing jet grouted material samples

Таблица 3

Результаты исследований проб пульпы и образцов грунтоцемента, изготовленных в лабораторных условиях

Table 3

Results of studies of the spoil return samples and jet grouted material samples prepared in laboratory conditions

Марка	В/Ц	Ц/Г	В/Т	Прочность, МПа	Плотность ГЦ (до водонасыщения), г/см ³	Плотность ГЦ (после водонасыщения), г/см ³	Плотность ГП (в пробе), г/см ³	Плотность ГП (в замесе), г/см ³
А	0,8	2,85	0,59	19,18	1,72	1,76	1,78	1,66
Б	1,0	2,42	0,71	11,77	1,63	1,67	1,70	1,65
В	1,5	1,75	0,96	4,18	1,55	1,55	1,53	1,44
Г	2,0	1,38	1,16	1,68	1,47	1,48	1,49	1,51
Д	3,0	0,96	1,47	0,59	1,41	1,42	1,39	1,35
Е	0,8	1,03	0,41	20,35	1,87	1,91	1,98	1,98
И	1,0	0,88	0,47	12,37	1,81	1,83	1,85	1,93
К	1,5	0,64	0,58	4,32	1,73	1,73	1,72	1,65
Л	2,0	0,50	0,67	2,08	1,68	1,69	1,65	1,67
М	3,0	0,35	0,78	0,64	1,58	1,58	1,58	1,56
У	0,8	0,55	0,29	22,06	2,05	2,06	1,81	2,06
Ф	1,0	0,47	0,32	14,41	2,03	2,04	1,97	1,97
Х	1,5	0,34	0,38	6,79	1,98	1,99	1,86	1,96
Э	2,0	0,27	0,42	3,32	1,95	1,95	1,85	1,84
УУ	3,0	0,19	0,47	2,11	2,01	2,01	1,80	1,79
АА	0,8	0,55	0,29	19,64	2,08	2,10	2,02	1,98
ГГ	1,0	0,47	0,32	13,14	2,11	2,12	1,98	1,95
ПП	1,5	0,34	0,38	3,21	2,07	2,08	2,06	1,71
ТТ	2,0	0,27	0,42	1,94	2,05	2,06	2,04	1,82
ХХ	3,0	0,19	0,47	0,85	1,98	1,99	2,00	1,79
СС	0,8	0,55	0,29	18,52	2,10	2,12	2,07	1,98
НН	1,0	0,47	0,32	9,59	2,12	2,13	2,04	1,93
АУ	1,5	0,34	0,38	3,82	2,10	2,11	2,04	1,84
ХУ	2,0	0,27	0,42	2,07	2,03	2,04	1,96	1,81
ХТ	3,0	0,19	0,47	1,00	1,99	2,00	1,89	1,77

Прочность составов на основе глины, суглинка, песка возможно сравнивать между собой только с учетом Ц/Г и В/Т.
 Ц/Г – отношение массы цемента к массе грунта в составе ГП и/или ГЦ.
 В/Т – отношение массы воды к сумме масс грунта и цемента в составе ГП и/или ГЦ.
 Плотность в пробе – плотность ГП, измеренная весовым способом путем отбора пробы объемом 1 литр из приготовленной в лабораторных условиях смеси в соответствии с ГОСТ Р 70696-2023 [12], ГОСТ 5802-86 [27].
 Плотность в замесе – плотность ГП, измеренная для всего замешиваемого состава в ведре объемом 10–20 литров.
 Результаты измерения плотности и прочности для составов У, Ф, Х, Э, УУ, АА, ГГ, ПП, ТТ, ХХ, СС, НН, АУ, ХУ, ХТ в данной статье используются только в качестве приблизительной оценки процессов

По результатам, представленным в табл. 3, можно сделать следующие выводы:

- соотношение компонентов в пульпе и в грунтоцементе влияет на плотность и прочность проб и образцов;
- тип грунта влияет на плотность пульпы и плотность, прочность образцов грунтоцемента;

- у составов на основе глины и суглинка плотность пульпы и грунтоцемента влияет на прочность грунтоцемента;
- разновидность песка и содержание глинистых частиц влияет на прочность образцов грунтоцемента.

По результатам исследований следует отметить отличия в результатах измерения плотности в отобранной пробе и плотности всей массы смеси. Для смесей на основе глин и суглинков данное отличие незначительно, а для смесей на основе песка плотность отобранной пробы выше, чем плотность всей массы смеси, что объясняется высоким содержанием воды и, как следствие, характером поведения грунтоцементной смеси при отборе пульпы как неоднородной суспензии.

Далее приводятся графики, в которых наглядно представлены указанные выше влияния. На графике (рис. 2) представлено влияние водоцементного отношения цементного раствора на прочность грунтоцемента по составам табл. 2 при различных типах грунта.

По графику на рис. 2 видно, что при увеличении В/Ц цементного раствора прочность начинает снижаться независимо от типа смешиваемого грунта.

На графике (рис. 3) представлено влияние содержания цемента в 1 м³ грунтоцементной пульпы на прочность образцов грунтоцемента, изготовленных в лаборатории по составам табл. 2, при различных типах грунта.

По графику на рис. 3 видно, что при увеличении содержания цемента в 1 м³ грунтоцемента путем снижения В/Ц цементного раствора прочность грунтоцемента начинает увеличиваться независимо от типа смешиваемого грунта.

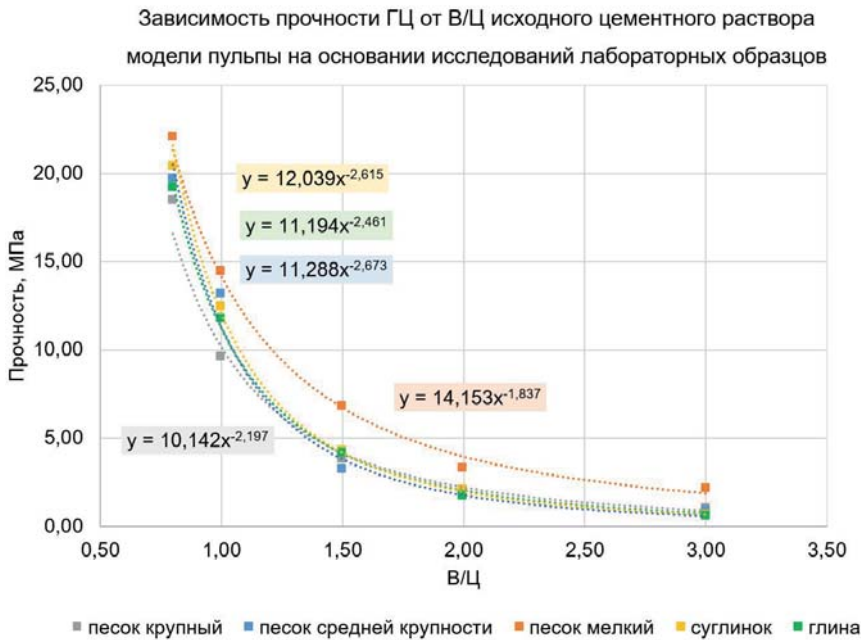


Рис. 2. График влияния водоцементного отношения цементного раствора на прочность грунтоцемента, изготовленного в лаборатории по составам табл. 2, при различных типах грунта
Fig. 2. Graph showing the impact of the water-cement ratio of the cement mortar on the strength of jet grouted material manufactured in the laboratory according to the compositions in Table 2, with different types of soil

На графике (рис. 4) представлена зависимость прочности грунтоцемента от плотности грунтоцементной пульпы для составов на основе глины и суглинка.

По графику на рис. 4 видно, что при увеличении плотности грунтоцементной пульпы с уменьшением водоцементного соотношения для составов на основе глины и суглинка увеличивается прочность грунтоцемента.

Результаты по зависимости прочности грунтоцемента от плотности грунтоцементной пульпы для составов на основе песка также показали тенденцию увеличения прочности грунтоцемента и, соответственно, плотности пульпы от возрастания содержания цемента в составе. Учитывая высокое содержание воды в исследуемых лабораторных моделях, полученные результаты в абсолютных значениях показателей отличаются от фактических значений, получаемых в полевых условиях, поэтому в работе была выполнена оценка получаемых результатов в виде тенденций и векторов развития исследуемых параметров.

На основании табл. 2 и рис. 4 справочно представлены табл. 4 и 5, по которым можно определить значение плотности, подлежащее контролю при формировании ГЦЭ в сухом грунте, для получения необходимой прочности грунтоцемента при заданном В/Ц исходного цементного раствора.

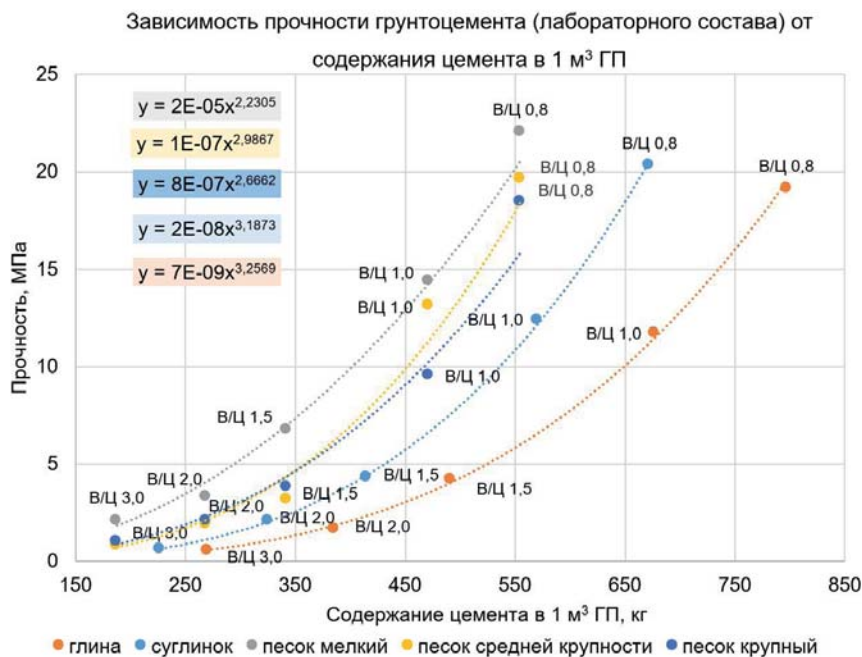


Рис. 3. График влияния содержания цемента в 1 м³ грунтоцементной пульпы на прочность образцов грунтоцемента, изготовленных в лаборатории по составам табл. 2, при различных типах грунта

Fig. 3. Graph showing the impact of cement content in 1 m³ of the spoil return jet grouted material on the strength of jet grouted material samples prepared in the laboratory according to the compositions in Table 2, with different types of soil

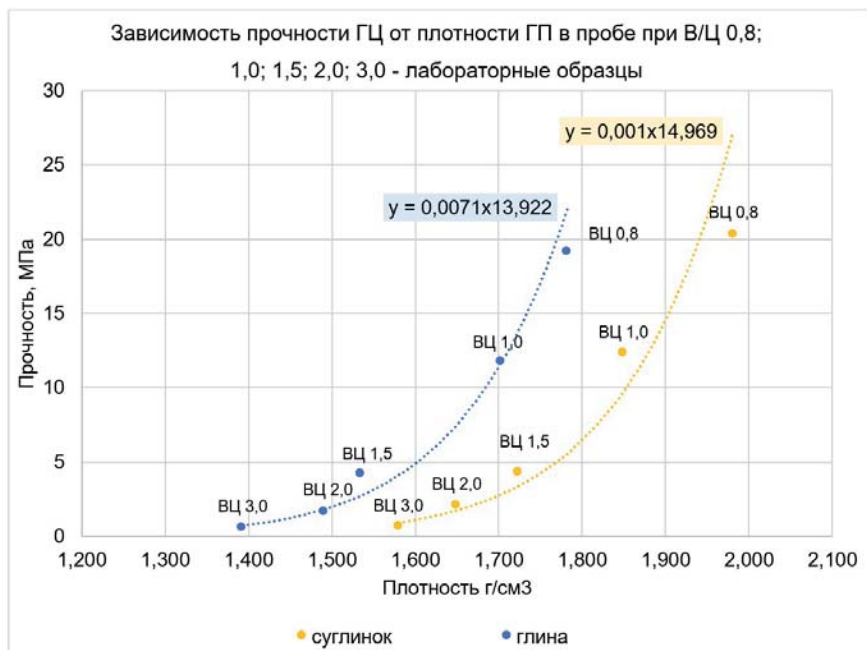


Рис. 4. График зависимости прочности грунтоцемента от плотности грунтоцементной пульпы для составов на основе глины и суглинка

Fig. 4. Graph showing the dependence of jet grouted material strength on the density of the spoil return jet grouted material for compositions based on clay and loam

Таблица 4

Результаты исследований лабораторных образцов ГП и ГЦ на основе глин (сухой грунт)

Table 4

Results of studies of laboratory samples of the spoil return jet grouted material and jet grouted material based on clays (dry soil)

Грунт – глина					
В/Ц исходного цементного раствора	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
$\rho_{\text{пульпы}}, \text{ г/см}^3$	1,78	1,7	1,54	1,49	1,39
Прочность ГЦ, МПа	19,18	11,77	4,18	1,68	0,59

Таблица 5

Результаты исследований лабораторных образцов ГП и ГЦ на основе суглинка (сухой грунт)

Table 5

Results of studies of laboratory samples of the spoil return jet grouted material and jet grouted material based on loam (dry soil)

Грунт – суглинок					
В/Ц исходного цементного раствора	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
$\rho_{\text{пульпы}}, \text{ г/см}^3$	1,98	1,85	1,72	1,65	1,58
Прочность ГЦ, МПа	20,35	12,37	4,32	2,08	0,64

Выводы

На основании полученных результатов по исследованиям плотности пульпы, плотности и прочности грунтоцемента получена зависимость увеличения прочности грунтоцемента при увеличении плотности грунтоцементной пульпы, в рамках изменения соотношения компонентов состава пульпы.

Кроме этого:

- определены параметры (сроки схватывания, плотность, водоотделение, подвижность) цементных растворов с В/Ц 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0, чаще всего применяемых в качестве инъекционных для технологии струйной цементации;
- прочность ГЦ увеличивается в интервале от 0,5 до 22 МПа при увеличении плотности ГП и ГЦ в интервале от 1,4 до 2,1 г/см³ для всех типов рассматриваемых грунтов, при уменьшении В/Ц исходного цементного раствора в интервале от 3,0 до 0,8;
- при увеличении В/Ц исходного цементного раствора уменьшается плотность ГП и ГЦ в интервале от 1,4 до 2,1 г/см³ и уменьшается прочность ГЦ в интервале от 0,5 до 22 МПа;
- прочность и плотность ГЦ зависят от гранулометрического состава песка и при низком В/Т (вода-твердом) отношении соответствуют составу смеси мелкозернистого бетона, однако с учетом повышенного содержания воды, что является обязательным условием технологии, исследуемые модели пульпы показали отличия в показателях, что подтверждает отличия между конструкционным материалом, которым является мелкозернистый бетон, и грунтом, закрепленным по технологии струйной цементации;
- прочность ГЦ уменьшается с увеличением содержания глинистых частиц в грунтоцементной пульпе;
- увеличение содержания цемента при уменьшении В/Ц исходного цементного раствора увеличивает прочность ГЦ и плотность ГЦ и ГП.

Метод оперативного контроля прочности грунтоцемента по плотности грунтоцементной пульпы возможен и после проведения дополнительных более углубленных исследований может быть применен в практике строительства. Исследования, рекомендуемые в качестве продолжения разработки темы:

- уточнение параметров пульпы и грунтоцемента на основе глины, суглинка и песка с отличным от принятых в данной работе содержанием цемента в 1 м³ грунтоцементной смеси;
- проведение исследований лабораторных образцов на моделях водонасыщенного грунта;
- разработка методики для уточнения параметров пульпы и грунтоцемента в лабораторных условиях, позволяющей исследовать пробы и образцы с увеличенным содержанием жидкости в составе со сведением к минимуму влияния неоднородности смеси на результат исследований;
- исследование полевых образцов пульпы и грунтоцемента с последующим коррелированием результатов лабораторных исследований.

Список литературы

1. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456074910>.
2. Бройд И.И. Струйная технология. Москва: Издательство ассоциации строительных вузов; 2004.
3. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. Москва: Стройиздат; 2010.
4. Малинин А.Г., Салмин И.А. О возможности контроля прочности грунтоцементных элементов по прочности грунтоцементной пульпы. Жилищное строительство. 2024;(9):11–13. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-11-13>
5. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Закрепление грунтов в подземном строительстве. Москва: АСВ; 2022.
6. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Способ контроля и прогнозирования параметров и прочности jet-свай при производстве работ. Вестник НИЦ «Строительство». 2017;13(2):41–50.
7. Малышев Л.И. Хасин М.Ф., Бройд И.И., Малышев Л.И. О способе сооружения противофильтрационных завес с образованием прорези водовоздушной струей. В: Прогрессивные решения в проектировании и производстве гидротехнических работ: сб. науч. тр. Гидропроекта. Москва: Ин-т «Гидропроект»; 1974, с. 27–36.
8. Корольков В.Н., Смородинов М.И., Сухарев С.Г., Федоров Б.С. Струйная технология устройства несущих конструкций в грунте. Основания, фундаменты и механика грунтов. 1984;(5):19–26.
9. Черняков А.В. Оценка долговечности грунтобетона в струйной технологии. Бетон и железобетон. 2012;(4):20–25.
10. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>
11. СП 291.1325800.2017. Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
12. ГОСТ Р 70696-2023. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации; 2023
13. ГОСТ Р 70695-2023. Грунты, закрепленные инъекционными растворами на основе цемента и силиката натрия. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации; 2023.
14. ГОСТ Р 59706-2022. Грунты химически закрепленные. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
15. ГОСТ Р 59538-2021. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2022.
16. Инструкция по изготовлению и применению грунтобетона в строительстве (СН 23-58). Москва: Госстройиздат; 1958.
17. Рекомендации по применению свай, устраиваемых с использованием струйной геотехнологии. НИИОСП, Лаб. № 38, Москва.
18. Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов. Москва: Минстрой РФ; 2020.
19. Методические рекомендации «Методы контроля качества искусственных оснований из закрепленных грунтов». Москва: Минстрой РФ; 2020.
20. Рекомендации по струйной технологии сооружения противофильтрационных завес, фундаментов, подготовки оснований и разработки мерзлых грунтов. Москва: ВНИИОСП; 1989.
21. BS EN 1997-1:2024. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1: General Rules. <https://doi.org/10.3403/30401997>
22. BS EN 1997-2:2007. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 2: Ground investigation and testing. <https://doi.org/10.3403/30047536>
23. BSI BS EN 12716-2018. Execution of Special Geotechnical Work – Jet Grouting. <https://doi.org/10.3403/30354261>
24. Duzceer R., Gokalp A. Construction and Quality Control of Jet Grouting Applications in Turkey. In: Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. American Society of Civil Engineers; 2003, pp. 281–293. [https://doi.org/10.1061/40663\[2003\]106](https://doi.org/10.1061/40663[2003]106)
25. Weidle A. Hoffmann H., Katzenbach R. Jet grouting – Chances of risk assessment based on probabilistic methods. In: 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul) [internet];

- 2001, pp. 1763-1766. Available at: <https://www.issmge.org/publications/publication/jet-grouting-chances-of-risk-assessment-based-on-probabilistic-methods> (accessed: 06 November 2024).
26. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ; 2020.
27. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2018.
28. ГОСТ 34532-2019. Цементы тампонажные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2019.
29. ГОСТ 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). Контроль параметров буровых растворов в промышленных условиях. Растворы на водной основе. Москва: Стандартинформ; 2015.
30. ГОСТ Р 70308-2022. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе тонкодисперсного вяжущего. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
31. ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001226>

References

1. SP 45.13330.2017. Earthworks, Grounds and Footings. Updated version of SNiP 3.02.01-87 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456074910>. (In Russian).
2. Broyd I.I. Inkjet technology. Moscow: Publishing House of the Association of Construction Universities; 2004. (In Russian).
3. Malinin A.G. Jet cementation of soils. Moscow: Stroyizdat Publishing House; 2010. (In Russian).
4. Malinin A.G., Salmin I.A. On the possibility of controlling the strength of soil cement elements by the strength of soil cement pulp. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing construction*. 2024;(9):11–13. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-11-13>
5. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Soil consolidation in underground construction. Moscow: ASV Publ.; 2022. (In Russian).
6. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Method of control and forecasting parameters and strength of jet-piles at the production of works. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017;(2):41–50. (In Russian).
7. Malyshev L.I., Khasin M.F., Broyd I.I. On the method of constructing anti-filtration curtains with the formation of a slit by an air-water jet. In: *Progressive solutions in the design and production of hydraulic engineering works. Proceedings of the Hidroproekt*. Moscow: In-t "Gidroproekt"; 1974, pp. 27–36. (In Russian).
8. Korolkov V.N., Smorodinov M.I., Sukharev S.G., Fedorov B.S. Jet technology of the device of load-bearing structures in the ground. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1984;(5):19–26. (In Russian).
9. Chernyakov A.B. Assessment of the durability of ground concrete in jet technology. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2012;(4):20–25. (In Russian).
10. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83* [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>. (In Russian).
11. SP 291.1325800.2017. Armed grouted structures. Rules of architectural design. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).
12. State Standard R 70696-2023. Cement based injection mortars. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russian).
13. State Standard R 70695-2023. Soils chemically fixed with mortars based on cement and sodium silicate. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russian).
14. State Standard R 59706-2022. Soil's chemical improvement. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. (In Russian).
15. State Standard R 59538-2021. Cement based injection mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2022. (In Russian).
16. Instructions for the manufacture and use of ground concrete in construction (CH 23-58). Moscow: Gosstroyizdat Publ.; 1958. (In Russian).
17. Recommendations for the use of piles arranged using jet geotechnology. NIIOSP, Lab. No. 38, Moscow. (In Russian).

18. Methodological guide for strengthening soils by jet cementation methods, deep mixing, injection with solutions based on micro-cements, cuff injection in hydraulic fracturing mode. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
19. Methodological recommendations Methods of quality control of artificial bases from fixed soils. Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
20. Recommendations on jet technology for the construction of anti-filtration curtains, foundations, preparation of foundations and development of frozen soils. Moscow: VNIIOSP; 1989. (In Russian).
21. BS EN 1997-1:2024. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1: General Rules. <https://doi.org/10.3403/30401997>
22. BS EN 1997-2:2007. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 2: Ground investigation and testing. <https://doi.org/10.3403/30047536>
23. BSI BS EN 12716-2018. Execution of Special Geotechnical Work – Jet Grouting. <https://doi.org/10.3403/30354261>
24. *Duzceer R., Gokalp A.* Construction and Quality Control of Jet Grouting Applications in Turkey. In: Third International Conference on Grouting and Ground Treatment. American Society of Civil Engineers; 2003, pp. 281–293. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)106](https://doi.org/10.1061/40663(2003)106)
25. *Weidle A., Hoffmann H., Katzenbach R.* Jet grouting – Chances of risk assessment based on probabilistic methods. In: 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul) [internet]; 2001, pp. 1763–1766. Available at: <https://www.issmge.org/publications/publication/jet-grouting-chances-of-risk-assessment-based-on-probabilistic-methods> (accessed: 06 November 2024).
26. State Standard 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
27. State Standard 5802-86. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
28. State Standard 34532-2019. Well cements. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
29. State Standard 33213-2014 (ISO 10414-1:2008). Field testing of drilling fluids. Water-based fluid. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
30. State Standard R 70308-2022. Injection mortars based on a finely dispersed binder for soil stabilization. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2022. (In Russian).
31. State Standard 310.3-76. Cements. Methods for determination of standard consistency, times of setting and soundness [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/871001226>. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Владимирович Антоненко[✉], аспирант, АО «НИЦ «Строительство»; инженер сектора усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab22@niiosp.ru

Dmitry V. Antonenko[✉], Postgraduate Student, JSC Research Center of Construction; Engineer, Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab22@niiosp.ru

Андрей Васильевич Шапошников, канд. техн. наук, заведующий сектором усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Andrey V. Shaposhnikov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

Анастасия Игоревна Мисюк, заместитель заведующего сектором усиления оснований и закрепления грунтов лаборатории освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab22@niiosp.ru

Anastasia I. Misyuk, Deputy Head of the Base Reinforcement and Soil Stabilization Sector, Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab22@niiosp.ru

Олег Александрович Шулятьев, д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией освоения подземного пространства городов (№ 35), НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: niiosp35@yandex.ru

Oleg A. Shulyatyev, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director for Scientific Work, Head of the Laboratory of Urban Underground Space Development (No. 35), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: niiosp35@yandex.ru

Игорь Николаевич Тихонов, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство»; руководитель центра № 21, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Igor N. Tikhonov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Building Structures and Materials, JSC Research Center of Construction; Head of Center No. 21, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Константин Пантелеевич Пятикрестовский, д-р техн. наук, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Konstantin P. Pyatikrestovsky, Dr. Sci. (Engineering), JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author